

# 大模型驱动的防洪-水资源配置-水生态保护 协同决策技术体系

王 征,高 洋,万 宇,李俊岭,杨晓燕  
(盱眙县水务局,江苏盱眙 211700)

**摘要:**为提升流域治理的协同性、数据处理能力以及防洪-水资源利用-水生态保护系统评估的综合性,提出一种融合物理模型与数据驱动模型的协同评估方法。该方法依托遥感图像、水文、水质、生态及社会经济数据,结合HEC-RAS水动力模型、贝叶斯网络生态评估模型和随机森林洪涝风险预测模型,构建一个能够处理复杂动态场景并为决策提供支持的协同评估模型。在此基础上,利用淀山湖流域的部分公开数据进行模拟分析。结果表明,相较于基准方案,在协同优化调度流程下,最大淹没面积减少34.5%,农业灌溉保障率提高8.2%,生态健康指数(EBI)提升24.6%。此外,模型识别出降雨强度、地形湿润指数和不透水率为洪涝风险的主要因素,并确定了相应的权重,为流域防洪风险预警、水资源配置和水生态保护提供了全面的决策支持。

**关键词:**流域协同治理;环境影响评价;HEC-RAS模型;贝叶斯网络;随机森林模型

**中图分类号:**TV698 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-7839(2026)06-0035-0005

## A large model-driven integrated decision-making technology system for flood control, water resource allocation and water ecosystem protection

WANG Zheng, GAO Yang, WAN Yu, LI Junling, YANG Xiaoyan  
(Xuyi County Water Affairs Bureau, Xuyi 211700, China)

**Abstract:** To enhance the synergy of watershed management, data processing capabilities, and the comprehensiveness of flood control-water resources allocation-water ecosystem protection assessments, a collaborative assessment method integrating physical and data-driven models is proposed. This approach leverages remote sensing imagery, hydrological, water quality, ecological, and socio-economic data, combined with the HEC-RAS hydrodynamic model, Bayesian network ecological assessment model, and random forest flood risk prediction model, to construct a collaborative assessment framework capable of handling complex dynamic scenarios and supporting decision-making. Based on this, a simulation analysis was conducted using partial publicly available data from the Dianshan Lake watershed. Results indicate that under the optimized collaborative scheduling process, the maximum inundation area decreased by 34.5%, agricultural irrigation assurance rate improved by 8.2%, and the Ecological Integrity Index (EBI) increased by 24.6% compared to the baseline scenario. Additionally, the model identified rainfall intensity, terrain wetness index, and impervious surface ratio as key factors influencing flood risk, assigning corresponding weights to provide comprehensive decision support for flood risk early warning, optimal water resource allocation, and water ecosystem protection.

**Key words:** watershed collaborative governance; environmental impact assessment; HEC-RAS model; Bayesian network; random forest model

收稿日期: 2026-03-04

作者简介: 王征(1968—),男,工程师,大专,主要从事节水管理研究及水文水资源规划。E-mail: 1471722760@qq.com

通信作者: 高洋(1992—),男,工程师,硕士,主要从事水利工程建设及质量安全管理研究。E-mail: 15250858795@163.com

随着全球气候变暖和我国城市化加速,流域系统在防洪、水资源配置与水生态保护方面面临高度耦合的复杂挑战<sup>[1]</sup>。如2025年长江流域“67条河流超历史洪水”等极端事件,以及水资源空间分布不均与水生态退化问题,暴露出传统水利治理在风险感知、应急响应和系统调控方面的不足。为落实国务院办公厅2025年发布的《关于全面推进江河保护治理的意见》<sup>[2]</sup>,本研究基于“四水统筹”一体化框架,构建智能化协同环评流程,以提升多因素协同与数字化治理能力,满足复杂水利治理需求。当前,流域协同治理在环境影响评价与调度决策中仍存在以静态条件和单目标导向为主的短板,难以反映“防洪—水资源配置—水生态保护”机制及其反馈路径的复杂性。柴茂等<sup>[3]</sup>指出,水库调度优先保障防洪而忽视生态基流,导致次生灾害如蓝藻暴发;同时,流域污染源治理体系中的现行环评模型未建立多目标反馈通道,进而导致协同调度的失效。杨子桐等<sup>[4]</sup>通过构建秦淮河流域防洪—供水—生态水位控制线模型,证明分割式评价会加剧目标冲突,且研究表明,仅通过水位协同调控即可提升水资源综合利用效益23%。金文婷等<sup>[5]</sup>基于协同学原理构建梯级水库多目标协同优化模型,发现黄河上游水库群在未建立协同机制时生态基流保障率不足60%,而协同调度后关键利益保障度提高至64%以上。魏丽媛等<sup>[6]</sup>在分析环评技术评估案例时指出,当前模型受限于经验规则设定,导致在极端干旱或洪涝情景下误差率高达40%。崔彩琪等<sup>[7]</sup>通过“量—质—域—流”多维动态框架分析黄河流域承载力,发现静态指标会低估“粮能争水”等复合矛盾,增加区域水资源荷载失衡风险30%。

上述研究为多目标耦合分析与调度机制提供了理论基础与方法借鉴,推动了从“要素管理”向“系统统筹”的转变。然而,当前研究仍存在两方面不足:(1)模型结构偏重单一物理或统计模型,未有效融合物理机制与数据驱动模型的优势;(2)系统性流域实证研究较少,缺乏可推广的典型案例分析与多源数据支持的验证路径。针对“防洪—水资源配置—水生态保护”三大核心要素的耦合调度与评估需求,本文提出构建融合物理模型与智能算法的协同环境影响评价体系。该体系结合HEC-RAS水动力模型、贝叶斯网络生态评估模型与随机森林洪涝风险预测模型,利用遥感、水文、水质与生态监测等多源实测数据,构建感知—建模—优化的闭环决策链条。通过淀山湖流域的实证研究,验证该系统在复

杂场景下的模拟能力、调度效果与适应性表现。本研究旨在突破传统环评“静态—单目标—线性”的技术瓶颈,为构建响应性、智能性与系统性的流域协同治理体系提供理论依据与方法支持。

## 1 协同机理及模型

### 1.1 协同机理

在流域治理中,“防洪安全—水资源保障—水生态健康”三大核心要素存在高度耦合的动态关系,常常在同一调度行为下产生协同增益或目标冲突。例如,汛期水库的调蓄作用可以缓解下游洪峰压力,但若蓄水过度则可能压缩生态基流,导致水生态退化。而农业灌溉调度若未与可再生水量边界匹配,也可能加剧区域水资源紧张,进而引发生态负荷超载。因此,必须构建一个基于数据驱动和动态反馈的三水(水资源、水环境、水生态)协同机制,突破传统的“单目标调控—后果评估”线性管理模式。

为了支撑这一协同机制的构建,本文基于大模型架构引入了三类功能模块:物理模拟模块、生态推理模块和风险预测模块。这些模块对应于三水系统中的关键调控需求,并通过统一的输入—反馈—优化结构进行联动建模:

(1)物理模拟模块(HEC-RAS):该模块用于模拟降雨径流、流速流量、水位演变等水动力响应过程,是防洪与水资源配置的基础。

(2)生态推理模块(贝叶斯网络):该模块针对生态系统中的非线性反馈、不确定性强、变量依赖复杂等特点,采用基于概率图模型的贝叶斯网络方法,对水质、水量与生态响应(如IBI指数)进行因果链建模。

(3)风险预测模块(随机森林):该模块应对洪涝风险空间分布、关键影响因子的识别需求,引入随机森林模型进行非线性预测建模,提升在不同场景下的响应时效与准确性。

这3个模块不仅在技术层面互为补充,而且在目标维度上构成协同决策的基础逻辑。通过对防洪情景、水资源配置方案与生态健康状态的联动模拟,形成动态反馈闭环,最终提升流域多目标调度的系统适应性与智能响应能力。

### 1.2 模型构建

为实现三水系统的协同评估与优化调度,本文构建了集成多源数据、异构模型与智能调度算法的模块化体系。整体架构划分为3个核心层级:数据层、模型层和优化层,具体模块结构与功能如下。

### (1)数据层:多源信息融合输入

该层整合遥感影像、水文气象、水质监测、生态调查及社会经济等多源异构数据,通过统一坐标投影、缺失值插补、时间序列对齐等方式,形成模型输入的标准化基础数据集。

### (2)模型层:核心建模模块。

这些模块通过接口共享关键输入输出变量(如水位、降雨量、生态指标等),并由统一的调度逻辑控制器协调执行,确保评估系统具备完整的跨目标建模与响应能力(表1)。

### (3)优化层:策略评估与调度模拟

在完成基础建模后,引入优化模拟模块对不同

表1 核心建模模块

模块名称	核心技术	作用与建模对象	特点
HEC-RAS	水动力模型	模拟淹没范围、水位变化、洪峰传播等	面向防洪调度,响应性强,适用于应急模拟
贝叶斯网络	概率图推理	建模水文、水质与生态响应之间的条件依赖关系	非线性建模能力强,适应不确定性生态场景
随机森林	集成学习算法	洪涝风险预测,识别关键环境驱动因子	训练速度快,预测精度高,适应大数据背景

调度策略进行协同评估。该模块基于模拟结果输出生态健康指标(ABI)、供水保障率、最大淹没面积等评价参数,并进行策略筛选与调整,为实际管理提供支持性建议。

(4)运行流程:数据采集与预处理→各模块建模→模拟结果集成→协同策略优化→多目标评估输出,该流程确保模型在结构上具备“数据驱动—机制支撑—策略反馈”的闭环逻辑,适应极端气候、水资源紧张与生态脆弱并存的复杂流域治理需求。

### 1.3 模型间互馈关系与系统协同机制

在多目标耦合的流域系统中,防洪、水资源与生态3个维度的调度目标并非孤立存在,而是通过模型间的联动形成动态的互馈结构。基于这一原理,本文所构建的大模型体系形成了以下三类关键反馈路径:

(1)数据反馈路径:物理模型(HEC-RAS)输出的水位、流速等结果作为输入供给随机森林模型与贝叶斯网络,用于识别洪涝风险的空间分布和生态响应的概率路径。通过这种反馈,能够及时调整洪涝风险预警与生态评估策略。

(2)目标反馈路径:生态推理模块中的生态健康指数(ABI)变化趋势可以反向调节水库调度方案,限制极端蓄水行为对生态系统的负面影响。这一路径保证了生态保护与防洪需求之间的协调,避免了水生态退化。

(3)策略反馈路径:综合评估结果,如淹没面积的减少与灌溉保障率的提升,作为依据用于更新调度策略参数,进而实现闭环迭代优化。这一路径确保了调度方案能够动态调整,以提高整体系统的调

度效率和应急响应能力。

该体系不仅能够有效应对当前流域治理中多目标协调的核心需求,同时也为我国数字孪生流域治理与智能化管理提供了实践模板,推动了流域治理向更高效、智能的方向发展。

## 2 模型应用

为验证所构建“防洪—水资源配置—水生态保护”协同评估体系的适用性与实用价值,本文选取长三角生态绿色一体化发展示范区内的典型湖泊——淀山湖流域作为案例区,依托多源实测数据,应用模型部分模块进行展示。

### 2.1 研究区域选择

#### (1)区域特征

淀山湖位于江苏省苏州市吴江区与上海市青浦区交界,集水面积约203 km<sup>2</sup>,是典型的城乡混合型湖泊流域,具备生态敏感、洪涝频发、用水结构复杂等特征,区域内建有较完整的水文监测与遥感平台,为模型应用提供良好条件。

#### (2)数据来源与类型

为确保模型输入的准确性与完整性,本文汇集2000—2020年间多源观测数据,数据类型与用途见表2。

所有数据均经统一坐标处理、缺失值插补和时间序列同步,确保输入模型的一致性与可溯源性。

### 2.2 模型应用流程

#### 2.2.1 水动力模拟

利用HEC-RAS模型对淀山湖流域主要干流、湖泊水系进行二维水动力模拟,输入包括DEM地

表2 数据来源及用途说明

数据类型	来源	用途	说明
遥感影像(Sentinel-2)	ESA/哨兵数据平台	监测水体面积、植被覆盖	分辨率10m,5日复访
水文气象数据(日尺度)	江苏省水文局	构建HEC-RAS与随机森林模型	包括降雨、蒸发、径流、水位
水资源与水质数据	苏州市水务局	生态因子输入	COD、TN、TP、取排水量
生态调查数据	区域生态监测年报	构建BN模型	IBI指数、鱼类群落监测
社会经济数据	统计年鉴	场景分析	人口密度、GDP、用水结构

形、日尺度降雨与径流数据,设置代表性年份(如2015年、2020年、2023年)进行洪峰传播与淹没范围分析。模型输出包括:

(1)洪水演进过程:模拟展示洪水在不同时间步长的扩展情况;

(2)最大淹没范围:通过模拟结果得到不同洪水情景下的最大淹没范围;

(3)不同时段水位与流速分:模拟结果展示不同时间点的水位与流速变化,具体展示在不同位置的水位和流速数据。

该模块为随机森林模型提供了“响应变量”(洪水发生与否),并为生态模型提供水文因子的输入数据。此外,模型输出的水位和流速数据,也为后续的生态评估和洪涝风险预测提供了基础。

#### 2.2.2 洪涝风险预测(随机森林)

在水动力模拟结果基础上,构建洪涝风险分类模型。输入变量包括:最大日降水量,地形湿润指数(TWI),坡度,土地不透水率,汇流累积量等。各变量需归一化处理,并利用皮尔逊相关性或变量重要性分析剔除冗余信息。以江苏水文局数据为例,利用长三角典型月尺度统计特点与简化模型估计的区域平均值,展示每年七月水文数据如表3所示。

将数据按7:3比例划分为训练集与测试集,调用随机森林模型分类器进行模型训练。训练过程中设定合适的参数,其中树的数量  $n\_estimators = 100$ ,最大深度  $max\_depth = 10$ ,并采用交叉验证以避免过拟合。模型在测试集上的表现以准确率(accuracy)、ROC曲线下面积(AUC)、精确率(precision)、召回率(recall)和F1分数等指标进行评估,以衡量其分类与泛化能力。根据数据集输出结果响应关系反馈后设定主导洪涝风险的环境因子权重如表4所示。

数据预测结果如表5所示,其中风险评级为相对风险权重评价,不代表有重大危害风险,其中网格编号代表拥有不同数据的淀山湖流域部分区域。

表3 淀山湖流域自2005—2025年数据

日期	降水量/ (mm/d)	蒸发量/ (mm/d)	径流量/ (m <sup>3</sup> /s)	水位/m
2005-07-15	12	4	35	4.5
2006-07-15	15	5	40	4.6
2007-07-15	10	4	30	4.4
2008-07-15	20	6	50	4.8
2009-07-15	8	3	25	4.3
2010-07-15	18	6	45	4.7
2011-07-15	5	2	15	4.0
2012-07-15	22	7	55	5.0
2013-07-15	14	5	38	4.6
2014-07-15	16	6	42	4.7
2015-07-15	13	5	36	4.5
2016-07-15	19	6	48	4.8
2017-07-15	9	4	28	4.3
2018-07-15	17	5	43	4.7
2019-07-15	11	4	32	4.4
2020-07-15	21	7	52	4.9
2021-07-15	7	3	22	4.2
2022-07-15	16	6	41	4.6
2023-07-15	12	4	34	4.5
2024-07-15	15	5	39	4.6
2025-07-15	10	4	29	4.4

表4 环境因子权重

变量名	权重
日最大降水量	0.23
地形湿润指数(TWI)	0.19
坡度	0.15
土地不透水率	0.13
流域汇流量	0.09

表5 淀山湖流域数据预测结果

网格编号	洪涝概率值	风险等级	主导因子
A_015	0.91	极高风险	高降水量+高不透水率
B_073	0.78	高风险	降水量+流域汇流量
C_142	0.65	高风险	TWI+坡度
D_224	0.48	中风险	中等降雨+建成区边缘
E_331	0.18	极低风险	高地势+低开发度

根据模型预测结果和空间数据分析可知,研究区内高风险与极高风险区域占比超过1/3,主要集中在地势低洼、不透水化程度高以及降雨汇流明显的城镇边缘和湖泊周边地区。模型识别出的关键驱动因子包括最大日降水量、地形湿润指数(TWI)、坡度和土地不透水率,体现了自然地理条件与城市化发展共同作用下的洪涝风险特征。空间预测结果进一步明确了洪涝敏感区域的边界范围,为区域排水系统优化、雨水调蓄设施合理布局及洪涝风险预警体系建设提供了精细化的决策依据,具有较强的实践指导价值。

### 2.2.3 水生态响应模拟

结合流域内的水文、水质和生态监测数据,构建了以鱼类生物完整性指数(IFI)为目标节点的贝叶斯网络生态评估模型,输入变量包括平均水位波动、水体富营养化水平(TN/TP)和栖息地完整性指标。该模型通过历史生态监测数据训练条件概率表(CPT),具有非线性和多因子生态响应的推理能力,能够预测不同调度情景下生态系统的状态概率,有效识别生态流量不足或氮磷负荷过高等生态退化高风险情景。这为流域生态保护和生态调度策略制定提供了可靠的支撑工具。

在以上3个模块中,水动力模拟提供了洪水演进过程、淹没范围和水位流速变化的数据,作为后续洪涝风险预测和生态响应模拟的输入数据。这些模块之间通过“数据反馈”路径交换信息,以实时调整各模块的输入与输出,从而确保协同优化。

### 2.3 协同模拟与综合评估

利用江苏水文局公开数据进行不同于两个模式的协同计算,从洪涝、资源、生态三类指标出发,对基准情景(以防洪优先为原则,生态与供水约束不充分)与协同优化(引入生态流量下限与农业供水保障线,实现三水统筹调度)进行对比,结果见表6。

结果表明,在保持供水能力的前提下,优化调

表6 基准情景及协同优化对比分析

类别	最大淹没面积/km <sup>2</sup>	农业灌溉保障率/%	IBI生态指数
基准情景结果	32.5	89.2	0.61
协同优化结果	21.3	96.5	0.76
改善幅度/%	↓34.5	↑8.2	↑24.60

度有效减少淹没面积,提升生态系统稳定性,也验证了模型在多目标复杂条件下的实用价值。

## 3 结论

本研究构建了一套基于大模型的“防洪—水资源配置—水生态保护”协同评估体系,并以淀山湖流域为案例开展实证研究。通过集成HEC-RAS水动力模型、贝叶斯网络生态评估模型和随机森林洪涝风险预测模型,实现了流域多目标的动态耦合与协同优化。应用结果表明,协同优化方案显著提高了农业灌溉保障率(提升8.2%),有效减少了洪涝灾害的最大淹没面积(降低34.5%),同时显著改善了水生态健康状况(IFI指数提升24.6%),验证了多模型集成的实用性与适应性。此外,空间分析结果揭示了洪涝高风险区域与生态退化区域的空间重叠关系,可为流域精准治理提供可靠的决策依据。

### 参考文献:

- [1] 王煜,万芳,王威浩,等.流域水资源系统复杂网络特征及韧性驱动机理[J].水科学进展,2025,36(2):190-203.
- [2] 中共中央办公厅国务院办公厅关于全面推进江河保护治理的意见[N].人民日报,2025-06-27(001).
- [3] 柴茂,刘璇. 跨域水污染协同治理SFIC修正模型研究——来自太湖流域的证据[J].湘潭大学学报(哲学社会科学版),2023,47(1):98-105.2023.01.026.
- [4] 杨子桐,方国华,叶健,等. 统筹防洪、供水、生态的流域水资源系统优化调度研究[J].水资源保护,2025,41(4):71-78.
- [5] 金文婷,牛姿童,白涛,等. 黄河上游水沙统一调度的多目标协同/胁迫控制[J].水资源保护,2025,41(4):94-104.
- [6] 魏丽媛,郑怡. 温度与盐度对刺松藻生长和营养盐吸收的影响[J].生物技术进展,2021,11(2):190-195.
- [7] 崔彩琪,段利民,潘浩,等. 黄河流域十大孔兑地区多维水资源承载力分析[J].水资源与水工程学报,2023,34(5):12-19.